

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.003

某防暴枪准两相流内弹道模型及数值模拟

赫雷, 秦鹏, 兰慧, 周克栋
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 从近代内弹道学理论入手, 在欧拉坐标系下建立某防暴枪内弹道准两相流的数学模型。在给定假设条件下, 给出模型的基本方程组及其定解条件。利用 Fortran 语言编制膛内准两相流场的计算软件, 并以 18.4 mm 某防暴枪为例, 获得该防暴枪准两相流各参数的变化规律。该研究可为进一步研究防暴武器工作机理打下坚实的基础。

关键词: 防暴枪; 内弹道学; 数学模型; 准两相流
中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Interior Ballistics Model and Numerical Simulation for Certain Type Riot Gun

He Lei, Qin Peng, Lan Hui, Zhou Kedong
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the modern interior ballistics theory, under the Euler coordinating system, the mathematical model of the quasi-two-phase interior ballistics of a riot gun was established. Under the given assumptions, the basic equations and boundary conditions of the model were given. The Fortran programming language was used to compile the calculation software for the quasi-two-phase interior ballistics. Taking 18.4 mm riot guns as an example, the parameters changing law of a quasi-two-phase flow were obtained for the riot gun. The obtained results provide a solid foundation for the further studies of the operation mechanism of riot weapons.

Keywords: riot guns; interior ballistics; mathematical model; quasi-two-phase flow

0 引言

近年来, 随着计算机技术和计算流体力学的不断发展, 已经可以对复杂的两相流瞬态过程进行精确的数值模拟^[1]。两相流在武器上也获得了广泛的应用, 解决了很多以前未能解决的问题, 如预装填金属风暴武器系统准两相流内弹道的数学模型^[2], 一维两相流下的某口径串联多药室火炮发射系统数学模型^[3]等, 得到了极高的使用价值。但文献检索结果表明, 国内外对于防暴枪准两相流内弹道的研究鲜有报道。笔者以某防暴枪为例, 建立其准两相流内弹道模型并进行数值模拟, 对此类武器的开发提供理论依据。

1 工作原理

从击发底火开始, 到弹丸获得最大速度为止的过程中发生了很多物理化学的变化^[4]。火药燃烧引起剧烈的化学反应, 释放出大量的燃气和能量, 伴随着药粒, 气体及弹丸的高速运动和动量、质量、能量的输运现象^[5]。从流体力学的范围来看, 膛内射击过程是典型非定常反应两相流体力学问题^[6]。

图 1 为防暴枪内弹道结构示意图。为了简化起见, 笔者采用近代内弹道学理论, 着手讨论准两相流动的内弹道数学模型。准两相流虽然涉及到火药气体和正在燃烧的火药固体两相的流动, 但不考虑

两相之间的复杂相互作用^[7]。

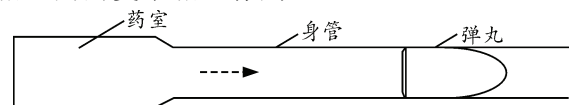


图 1 某防暴枪内弹道结构示意图

2 防暴枪准两相流内弹道模型的建立

2.1 基本假设

在射击过程中, 膛内产生了非常复杂的物理和化学变化, 要做出一些简化假设^[8]。内弹道模型基本假设有:

- 1) 以平衡态来处理所涉及到的热力学过程, 忽略火药气体的离解现象。并认为生成物的组分保持不变, 火药力、火药气体余容、比热比都视作常数。此外, 也不考虑气、固两相间的热传导和相互作用。
- 2) 膛内的流动视为一维。膛内的各参量, 如速度、密度、压力等都看成是位置 x 和时间 t 的函数。
- 3) 弹丸的阻力和火药气体的热损失通过火药力、阻力系数、绝热系数来修正, 不进行直接计算。
- 4) 由于固相的药粒比分子大得多, 对混合物的压力没有贡献, 气相的压力也就是混合物的压力。
- 5) 不考虑气体的粘性及气体对身管的摩擦。
- 6) 在微元体积中, 火药燃烧服从几何燃烧定律。所有药粒虽然假设同时点燃, 但每个药粒各自在所处位置的压力下进行燃烧。

收稿日期: 2014-02-17; 修回日期: 2014-03-14

作者简介: 赫雷(1973—), 女, 辽宁人, 硕士, 副教授, 从事身管武器发射技术研究。

7) 不考虑两相之间的相互作用, 火药固相颗粒与火药气相具有一致的运动速度。

8) 挤进过程不予考虑, 即认为弹丸是瞬时挤进。

9) 假定火药气体的内能仅取决于火药气体的温度, 并忽略固相的内能。

2.2 准两相流内弹道基本方程组

在给定基本假设条件下, 准两相流内弹道基本方程组^[6]为:

1) 质量守恒——连续方程。

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + A \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中: A 为枪膛截面积; ρ 为火药混合相密度; u 为火药混合相的流速。

2) 动量方程——欧拉方程。

$$A \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + A \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) = 0 \quad (2)$$

式中 p 为压力。

3) 能量守恒——能量方程。

$$A \frac{\partial}{\partial t}(\rho e_m) + A \frac{\partial}{\partial x}(\rho u e_m) + A \frac{\partial}{\partial x}(P u) - \frac{A \rho f}{k-1} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

式中

$$e_m = e_g + \frac{u_g^2}{2} \quad (4)$$

其中: e_g 为火药气相的内能; u_g 为火药气相的流速; u 为火药混合相的流速; f 为火药力; k 为绝热指数; ψ 为膛内火药相对已燃质量(体积)。

4) 状态方程。

$$P \left(\frac{1}{\rho} - \alpha \psi - \frac{1-\psi}{\delta} \right) = f \psi \tau \quad (5)$$

式中: α 为火药气体的余容; δ 为单位体积火药的质量; τ 为火药温度与火药定容燃烧温度比值。

5) 形状函数。

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (6)$$

式中: χ 、 λ 、 μ 为火药形状特征量; z 为火药相对已燃厚度。

6) 燃速方程。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1}{e_1} P^\gamma \quad (7)$$

式中: u_1 为燃速系数; e_1 为火药厚度的一半; γ 为燃速指数。

方程组是封闭的。当边值条件和初始条件给定时, 就可以得到方程组的确解。

2.3 方程组的定解条件

1) 边界条件。

左边界是膛底, 不考虑武器的后坐, 膛底的流速始终为零, 即

$$u(0, t) = 0 \quad (8)$$

右边界是弹底, 射击过程中, 火药燃烧推动弹丸, 使弹丸不断向前加速运动, 因此弹底是一个动边界, 即右边界是一个动边界^[9]。可知, 弹丸的运动速度和弹底位置的流速一致。在某瞬间弹丸运动到 x_d 位置时, 根据弹丸的运动方程, 可得

$$u(x_d, t) = \int_0^t \frac{A(p_d - p_f)}{\varphi_1 m} dt \quad (9)$$

式中: p_d 为弹底压力; p_f 为弹前的激波阻力; m 为弹丸质量; φ_1 为阻力系数。

2) 初始条件。

不考虑弹丸挤进过程, 起始状态简化为等容过程。设药室长为 l_{ys} , 当 $t=0$, $0 \leq x \leq l_{ys}$ 时, 各个参数的初始值为:

$$\begin{cases} P = P_j \\ \tau = 1 \\ \rho = \rho_0 = \Delta = \frac{\omega}{W_0} \\ u = 0 \\ z = z_0 = \frac{\sqrt{1 + \frac{4\lambda\psi_0}{\chi}} - 1}{2\lambda} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_j 为挤进阻力; Δ 为装填密度; ω 为装药量; W_0 为药室容积。

3 准两相流内弹道的计算结果分析

3.1 模型验证

笔者以某 18.4 mm 防暴枪为例进行研究。通过查询相关文献, 列出笔者所采用 18.4 mm 防暴枪的基本参数, 如表 1 所示。

表 1 防暴枪内弹道计算基本参数

口径 d/m	弹丸质量 m_a/kg	药室容积 W_0/m^3	挤进阻力 p_j/Pa	阻力系数 φ_1
0.018 4	0.002 4	0.000 003 85	4 900 000	1.12
火药力 $f/(J/kg)$	绝热指数 k	火药密度 $\delta/(kg/m^3)$	火药厚度 $2e_1/m$	枪膛截面积 A/m^2
900 000	1.25	1 580	0.000 2	0.000 274

根据前面所建立的数学模型, 使用 Fortran 程序语言编制了防暴枪准两相流内弹道计算软件。使用软件计算出弹丸初速的理论值, 与实验平均值相对比, 进行模型验证, 考察理论计算的正确性。

弹丸初速理论值与实验平均值如表 2 所示。

表 2 弹丸初速理论值与实验平均值对比

理论值 $u/(m/s)$	实验平均值 $u/(m/s)$	相对误差 $\delta_w(\%)$
340.059 3	338.1	5.8

由表 2 对比发现，计算值与实验值相比，相对误差仅为 5.80%，说明理论计算具有很高的准确性，也说明了文中所建立的准两相流的内弹道数学模型是切实可行的。

3.2 内弹道计算结果分析

通过数值模拟，得到了准两相流内弹道时期的弹底和膛底各参数的变化曲线，如图 2~图 3。

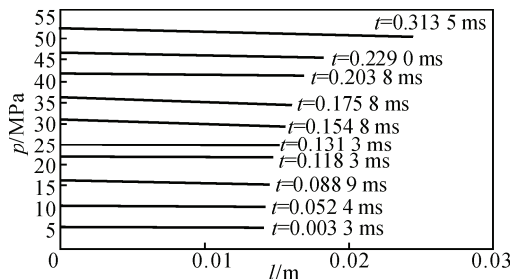


图 2 最大膛压出现之前膛内弹后 $p-l$ 曲线

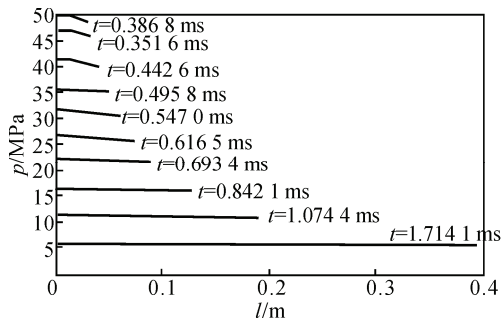


图 3 最大膛压出现之后膛内弹后 $p-l$ 曲线

图 2、图 3 为不同时刻膛内弹后的 $p-l$ 曲线，即膛内不同时刻，弹后的压力沿枪膛轴线分布的曲线图。

图中给出了从 0.003 3~1.714 1 ms 过程中同一时刻膛内弹后不同位置点的压力值，0.003 3 ms 时弹底压力达到启动压力，弹丸开始运动，内弹道计算开始；1.714 1 ms 时，弹丸离开枪口，内弹道计算结束。

在内弹道时期的任一时刻，最大压力始终出现在膛底，并沿着枪膛轴线方向呈现缓慢下降的趋势，到弹底位置，压力最小。在不同时刻，膛内同一位置的压力也有所不同， $t=0.313 5$ ms 时，弹后膛内不同位置点的压力比其他时刻要大，且此时膛底出现内弹道时期的最大膛压，为 52.405 6 MPa。

图 4 为内弹道时期弹底的压力 p 随时间 t 的变化曲线图。

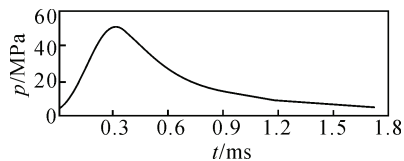


图 4 弹底 $p-t$ 曲线

随着火药燃烧产生的能量推动弹丸速度迅速增加，同时弹后的空间也不断变大，火药燃烧产生的能量被“稀释”，导致弹底压力 p 的增加速率由大逐渐变小。 $t=0.003 3$ ms 时，弹丸刚启动，弹底压力最小，为 5.138 8 MPa； $t=0.290 8$ ms 时，弹底压力达到最大，为 51.279 0 MPa。

图 5 为内弹道时期弹底的速度 u 随时间 t 的变化曲线图。

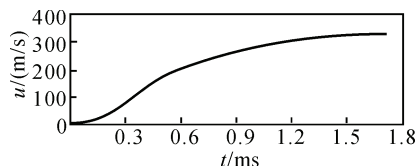


图 5 弹底 $u-t$ 曲线

弹丸速度增加的速率，即弹丸加速度 $a(a=\Delta u/\Delta t)$ 。 $a \propto F(a=F/m)$ ， $F \propto p(F=pS)$ ，所以 $a \propto p$ ，在 $t=0.290 8$ ms 弹底压力达到最大 51.279 0 MPa 时，弹丸加速度也最大。0~0.290 8 ms 时，加速度逐渐增大；0.290 8~1.714 1 ms 时，加速度逐渐减小。但是在内弹道时期，弹丸加速度始终大于零，所以弹丸一直处于加速状态，直至飞离枪口。

图 6 为内弹道时期弹底火药混合相密度 ρ 随时间 t 的变化曲线图。

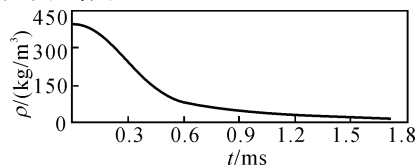


图 6 弹底 $\rho-t$ 曲线

由于火药不断燃烧以及弹后空间不断增加等因素，导致火药混合相密度不断降低。曲线显示下降速率呈现先变大后变小的趋势。在弹丸刚开始运动时，火药混合相密度最大，为 401.584 kg/m³，此后不断减小，弹丸离开枪口位置时，弹底火药混合相密度最小，为 14.412 1 kg/m³。

图 7 为内弹道时期弹底火药温度与火药定容燃烧温度比值 τ ，随时间 t 的变化曲线图。

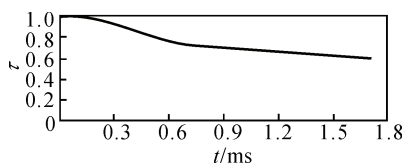


图 7 弹底 $\tau-t$ 曲线 (下转第 19 页)